

МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОГО ЕЛЕКТРООПОРУ

- ЛОСКУТОВ С.В. д-р ф.-м. н., професор, професор кафедри фізики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: svl@zntu.edu.ua;
- ЩЕТИНІНА М.О. ст. лаборант кафедри ТАД Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: Majtimo11@gmail.com;
- ЗЕЛЕНІНА О.А. аспірант кафедри фізики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: hellen_shi@mail.ru;

Мета роботи. Визначити вклад реального розподілу плям контакту у загальну провідність контакту провідників.

Методи дослідження. Дослідження електричного опору стягування здійснювались на моделях. Експериментальна частина даної роботи виконувалась на папері з графітовим шаром з перетинками (перший тип) і на електропровідних рідинах з дискретними перегородками (другий тип).

Отримані результати. Показано, що контактний електроопір в основному визначається величиною фактичної площі контакту металів. Отримано експериментальні залежності електроопору моделі другого типу від відстані між електродами та розподіл потенціалу по поверхні зразка для моделі першого типу. Розглянуто теоретичну модель, засновану на принципі суперпозиції електричних полів. Залежності, отримані експериментально і розраховані за допомогою теоретичної моделі, добре узгоджуються.

Наукова новизна. Вперше досліджені закономірності формування електричного опору стягування на великій кількості перетинок. Розроблена нова модель дискретного електричного контакту на основі рідини як провідного середовища з перетинкою з ядерної мембрани. Зроблено висновки про адитивність контактного і об'ємного електроопору.

Практична цінність. На основі результатів даних досліджень була розроблена нова експериментальна методика кінетичного макроїдентування, що в якості параметра деформування поверхневого шару металів використовує площу фактичного контакту. Дана методика дозволяє визначати величину середніх контактних напружень, межу пластичності, зміну напружень по глибині деформування у залежності від режимів обробки поверхні.

Ключові слова: опір стягування; фактична площа; електричний потенціал; ядерна мембрана.

I. ВСТУП

Контактний електроопір з'єднань має великий вплив на довговічність і надійність роботи складних електротехнічних систем, таких як двигуни постійного і змінного струму, систем релейного захисту [1] тощо. Взаємодія металевих деталей здійснюється через шорсткий шар, тому контакт сполучених поверхонь має дискретний характер. При проходженні електричного струму через контактуючі деталі лінії струму стягуються до обмежених ділянок торкання двох поверхонь [2], [3]. У безпосередній близькості до маленької плями контакту локалізується опір, обумовлений стягуванням ліній електричного струму [4], [5]. Це явище призводить до збільшення електричного опору у порівнянні з тим випадком, якщо б електричний струм проходив через повну поверхню [6]. Тому поверхня торкання металів є джерелом контактного електричного опору. Цей опір пов'язаний з механічною і фізико-хімічною трансформацією поверхневих шарів і дозволяє виявити основні процеси контактної взаємодії.

У роботі [7] було розроблено метод оцінки товщини граничного змашувального шару (нанометрово-

го діапазону), заснований на вимірюванні його електричного опору. Контактний електроопір з'єднань з анізотропними провідними плівками розглядався у [8], а псевдорідкометалевих з'єднань – у [9]. У роботі [10] досліджувався вплив відношення контактної площі до товщини плівки на контактний опір між золотими плівками.

3D-модель електричного контакту шорстких тіл, виготовлених з алюмінію АД1, була запропонована у роботі [11]. Вона дозволяє знайти величину електричної контактної провідності у залежності від тиску. Експериментальні дослідження контактного електроопору між шорсткими поверхнями алюмінієвих дисків з прикладанням стискуючих напружень показали, що при напруженнях 0,03-1,18 МПа його залежність від прикладених нормальних напружень визначається степеневим законом, показник якого тісно пов'язаний з топологією поверхні [12].

У даній роботі вирішується питання врахування вкладу реального розподілу плям контакту у загальну провідність контакту провідників, вивчається вплив груп плям одна на одну і асиметрії їх розподілу.

Дискретний характер взаємодії електричних контактів пов'язаний з нерівномірністю пластичної дефо-

рмації по поверхні пари металів, які контактують, неоднорідністю густини поверхневих дефектів, розходженням полів пружних напружень у кристалічних ґратках і появою, у зв'язку з цим, енергетичного рельєфу поверхні. На все це впливають локальні електричні поля і виділення теплоти в областях фактичного контакту. Складність умов контактної взаємодії і різноманітність процесів, що супроводжують процес контактної електричного опору, не дозволили дотепер створити послідовну фізичну картину явищ, які протікають у при поверхневих шарах контактуючих тіл. У зв'язку з цим актуальним є розвиток фізичних методів дослідження закономірностей формування контактної електричного опору.

Дотепер виконуються роботи по розробці моделі електропровідності контактів. Особливу актуальність проблема контактної електропровідності здобуває з розвитком мікро- і нанотехнологій.

Представляється перспективним використовувати ядерні мембрани для моделювання КЕО. Технологія виготовлення ядерних мембран дозволяє одержувати практично будь-які розміри контактних площин і їх розподіл за розмірами.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Опір стягування можна розрахувати як функцію параметрів контактної електропровідної поверхні. Згідно Р. Хольму [13], опір стягування R виражається формулою:

$$R = \frac{\rho}{2\bar{a}n}, \quad (1)$$

де ρ – питомий електроопір, \bar{a} – середній радіус плями контакту; n – число плям контакту.

Число n визначається наступним чином:

$$n = \frac{A_r}{\pi\bar{a}^2}, \quad (2)$$

де A_r – площа фактичного контакту; \bar{a}^2 – середній квадратичний радіус кругової площі контакту. Підставляючи вираз (2) в (1), отримуємо:

$$R = \frac{\pi\rho\bar{a}^2}{2\bar{a}} \cdot \frac{1}{A_r} = \frac{\alpha}{A_r}.$$

Середня площа плям контакту слабо залежить від навантаження і в основному визначається мікрогеометрією контактуючих поверхонь [14]. Тому значення α буде змінюватись при збільшенні навантаження на сполученні метали неістотно. Це дає основу для важливого висновку про те, що електроопір сполученої пари обернено пропорційний площі фактичного контакту.

На контактний опір з'єднання також впливає місцезнаходження провідної плями відносно центру поперечного перерізу циліндричного електрода і вза-

ємне розташування плям. Зміщення контактної плями від центру до краю електрода може призвести до збільшення контактної опору на 35%. Контактний опір електродів з близько розташованими плямами приблизно на 40-50% більший за опір невзаємодіючих контактних плям. Плями ж припиняють істотно впливати одна на одну, коли відстань між їх центрами у 10-20 раз більша за їх радіуси [15].

Якщо контактні плями вкриті плівкою, то, згідно Р. Хольму, контактний опір має дві складові:

$$R = \frac{\rho}{2n\bar{a}} + \frac{\rho_m\delta}{\pi\bar{a}^2n}$$

де ρ_m – питомий опір плівки; δ – товщина плівки. Підставляючи у цей вираз формулу (2), отримуємо:

$$R = \left(\frac{\pi\rho\bar{a}^2}{2\bar{a}} + \frac{\rho_m\delta\bar{a}^2}{\bar{a}^2} \right) \cdot \frac{1}{A_r} = \frac{\beta}{A_r}$$

де β – коефіцієнт, що залежить від властивостей плівки і геометричних параметрів контакту. Знову видно, що $R \sim 1/A_r$. Результати проведеного аналізу показали можливість визначення площі фактичного контакту по значенню електроопору пари сполучених металів.

Дослідження опору стягування на моделі контактної системи у вигляді плоскості мідної пластини з однією контактною перемичкою показало, що залежність опору стягування від площі перетину контактної перемички має вигляд складної степеневопоказникової функції [16].

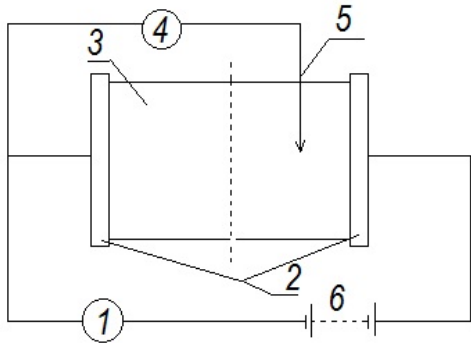
З початку 20 століття і до теперішнього часу робляться зусилля з розробки моделі електропровідності контактів. Особливої актуальності задача контактної електропровідності набуває з розвитком мікро- і нанотехнологій.

Визначення опору стягування – це проблема, що має значне технічне значення. Електричний контактний опір відіграє важливу роль у таких сферах застосувань, як зварювання опором, пристрої мікроелектроніки, електричні з'єднувачі та вуглецеві щітки.

Основним методом дослідження закономірностей формування й еволюції контактної електроопору є моделювання: комп'ютерне [10], аналітичне [15]. Зустрічаються роботи по експериментальному визначенню контактної електроопору для поверхонь із різною шорсткістю [3], [12]. Основними параметрами, що визначають КЕО, є: розмір і розподіл фізичних площадок контакту, зміни їх у процесі контактної взаємодії, урахування взаємного розташування й близькості до границь електродів [2], [8]. У розглянутих роботах вирішуються конкретні завдання. Для розширення можливостей моделювання контактної електроопору, дослідження особливостей формування контактної електроопору необхідно вимірювати й контролювати якомога більше параметрів, що визначають контактний електроопір.

III. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ СТЯГУВАННЯ НА МОДЕЛЯХ

У даному розділі представлені експериментальні результати дослідження фізичної природи і ролі геометричних факторів у контактному електроопорі. Робота була виконана на двох типах моделей: на папері з графітовим шаром із перемичками і на електропровідних рідинах, з дискретними перегородками.



1 - амперметр; 2 - електроди; 3 - графітовий папір; 4 - вольtmетр; 5 - вимірювальний щуп; 6 - джерело живлення.

Рисунок 1. Схема вимірювання розподілу потенціалу та опору стягування на зразках із паперу зі струмопровідним шаром

На рис. 2 представлений експериментально отриманий графік розподілу потенціалу по поверхні зразка першого типу. Видно, що зі зменшенням ширини перемички зростає різниця потенціалів в області перемички. При перемичці, що займає 0,5 % ширини зразка, частка падіння потенціалу на ній складає 84,2%. Отже, при малих розмірах електропровідної перемички падіння потенціалу в основному локалізується в області, що оточує перемичку. Рис. 3 ілюструє вплив кількості однакових перемичок на зміну потенціалу. Спостерігається аналогічна залежність – відбувається локалізація потенціалу поблизу перемичок.

Експериментальні та розраховані значення електроопору моделі з множинним «контактом» представлені у табл. 1. Результати вимірювань добре описуються виразом:

$$R = \frac{C_1}{n} + \frac{C_2}{n^2}, \quad (3)$$

де C_1 і C_2 - константи; n – число перемичок.

Визначення R відбувалось на основі закону Ома. Так як визначити товщину h шару, що проводить, складно, у розрахунках використовували ефективний питомий опір $\rho_{\text{ef}} = \rho/h$. Його значення по даним вимірювань складає 2,42 кОм. При великих значеннях n роль другого додатка у формулі (3) є незначною; тоді опір множинного контакту можна розрахувати за формулою:

$$R = \frac{C}{n\bar{a}^2}, \quad (4)$$

де C – константа, Ом·м²; \bar{a}^2 – середня квадратична півширина перемички.

Формула (4) відповідає обернено пропорційній залежності R від сумарної площі контактних плям. Таким чином, проведене дослідження підтверджує цю залежність.

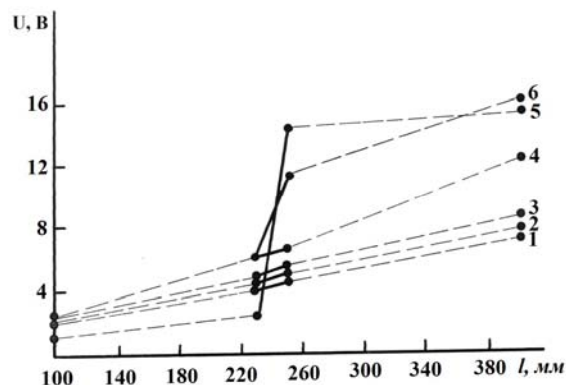


Рисунок 2. Розподіл потенціалу по поверхні зразка

Сила струму 1,5 А. Розміри зразка – 247×480 мм². Ширина перемички, мм: 1 – 207; 2 – 167; 3 – 127; 4 – 47; 5 – 1,3; 6 – 1,2.

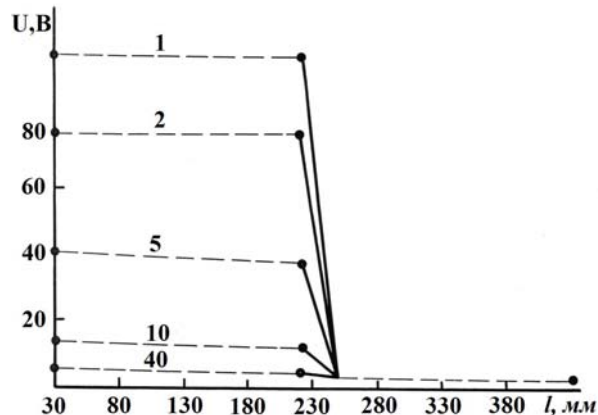


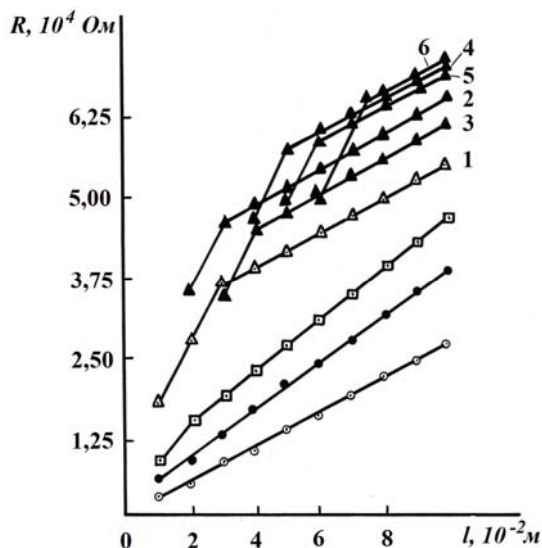
Рисунок 3. Вплив кількості провідних перемичок на розподіл потенціалу вздовж зразка

Сила струму 0,7 А. Цифри біля кривих означають кількість перемичок. Середня ширина перемички – 0,98 мм.

Поряд з перевагами простоти і зручності вимірювань, модель на основі графітового паперу не дозволяє врахувати вклад об'ємного опору. Для вирішення цього питання годяться моделі, у яких середовищем, що проводить, є рідина, наприклад, звичайна вода. Модель, що використовувалась в експериментах, представляла собою циліндричну посудину, розділену по перетину тонкою ізолюючою плівкою з отворами. Особливий інтерес викликають досліджен-

ня на моделі, де імітація контактуючих поверхонь здійснювалась за допомогою ядерної мембрани, а як електропровідне середовище використовувалась дистильована вода. Ядерні мембрани отримують шляхом опромінювання полімерних плівкових матеріалів прискореними у циклотроні важкими іонами і наступною фізико-хімічною обробкою [17]. Основними властивостями структури ядерних мембран є мала товщина і висока однорідність отворів по розмірам. Можна отримати мембрани з діаметром отворів від 0,05 до 2,0 мкм, що відповідає діаметрам плям контакту реальних металів. Зафарбовування лаком окремих ділянок поверхні мембрани дозволяє імітувати розподіл контурних площадок контакту A_c .

Результати вимірювань електроопору моделі з контурною площею, що зменшується, представлені на рис. 4., та у табл. 1.



діаметр мембрани: ○ – 68; ● – 51; □ – 34; ▲, △ – 17 мм; 1-6 – послідовні зміщення одного електрода.

Рисунок 4. Залежність електроопору моделі від відстані між електродами

Середній діаметр отворів складав 0,3 мкм. Площа усіх отворів займала 0,094 від загальної площі мембрани, тобто складала $\approx 10\%$ A_c . Проведемо розрахунок за формулою Р. Хольма електроопору моделі для контурної площі з діаметром 17 мм [1]:

$$R = r + \frac{\rho}{2an} + \frac{\rho}{D} \quad (5)$$

де r – об'ємний опір моделі, D – діаметр контурної площі контакту.

Для радіуса отвору 0,3 мкм площа складає $0,07 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Контурному діаметру 17 мм відповідає площа $2,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Тоді, у даному випадку, кількість отворів складає $3,24 \cdot 10^9$. При питомому електроопорі води 550 Ом·м, другий доданок у формулі (5) рівний 0,28 Ом, а третій – $3,24 \cdot 10^4$ Ом. Результати вимірювань, як видно з графіку (початкова лінійна ділянка

кривої 1), відповідають розрахованому значенню контурного опору. Це означає, що контурна площа визначає величину контактної електроопору.

Таблиця 1. Порівняння експериментальних і розрахованих величин електроопору моделей з різною кількістю перемичок

| Кількість перемичок, n | Повний R_{Σ} , кОм | Стягування | | $\frac{\Delta R}{R}$, % |
|------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | експеримент R_e , кОм | розрахунок R_p , кОм | |
| 0 | 3,80 | - | - | - |
| 42 | 6,59 | 2,83 | 2,79 | -1,4 |
| 35 | 7,43 | 3,79 | 3,71 | -2,1 |
| 30 | 9,10 | 5,29 | 5,30 | 0,2 |
| 25 | 9,40 | 5,71 | 5,60 | -1,9 |
| 20 | 10,30 | 6,86 | 6,50 | -5,2 |
| 15 | 12,60 | 8,79 | 8,80 | 0,1 |
| 10 | 19,30 | 15,21 | 15,50 | 1,9 |
| 5 | 58,81 | 51,43 | 55,01 | 6,9 |
| 4 | 76,71 | 75,29 | 72,91 | -3,2 |
| 3 | 101,54 | 97,07 | 97,74 | 0,7 |
| 2 | 111,11 | 108,36 | 107,30 | -0,9 |
| 1 | 147,23 | 142,29 | 143,43 | 0,8 |

Криві 1-6 відповідають вимірюванням опору моделі при послідовному зміщенні мембрани відносно електродів. На всіх кривих чітко проявляється явище опору стягування ліній струму в околі контурної площі, що проводить. Причому довжина стягування (довжина початкової лінійної ділянки, крива 1) рівна діаметру контурної площі. Для кривих 2 - 6 показана половина довжини стягування, так як вимірювання проводились при зміщенні тільки одного електрода. Зміна положення мембрани відносно електрода, фіксованого на початку координат, призводила до збільшення повного опору моделі, що виходило на насичення, криві 4- 6.

IV. ОБГОВОРЕННЯ

Для пояснення отриманих явищ була розглянута теоретична модель, заснована на принципі суперпозиції електричних полів. Розглянемо нескінченний провідник з впаяними в нього двома однаковими сферичними електродами. Спершу уявимо, що один з електродів видалений, і замість нього введений електрод у вигляді сферичної поверхні, концентричної з першим і з нескінченним радіусом. При цьому густині струму на відстані α від електрода 1 (рис. 5) дорівнює:

$$j = \frac{I}{4\pi\alpha^2},$$

де I – сила струму, що не залежить від a . Тому напруженість поля має вигляд:

$$E = \rho j = \frac{\rho I}{4\pi a^2},$$

де ρ – питомий опір. Прирівнюючи цей вираз до $-\frac{d\phi}{d\alpha}$:

$$-\frac{d\phi}{d\alpha} = \frac{\rho I}{4\pi a^2}$$

знаходимо потенціал ϕ' у випадку, коли електродами є поверхні I і S_∞ :

$$\phi' = \frac{\rho I}{4\pi a} + const$$

Якщо далі уявити, що видалений електрод 1 і електродами є поверхні 2 і S_∞ , причому струм тече від S_∞ до 2, то потенціал визначається формулою:

$$\phi'' = -\frac{\rho I}{4\pi a'} + const,$$

де a' – відстань від точки спостереження до електрода 2. Відмітимо, що сила струму входить у цей вираз з протилежним знаком у порівнянні з виразом для ϕ' .

Поле у реальній задачі з електродами 1 і 2 можна розглядати як результат накладання полів ϕ' і ϕ'' , електрод S_∞ при цьому самоусувається. Отже, потенціал за наявності двох електродів визначається за формулою:

$$\phi = \phi' + \phi'' = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \right) + const$$

Якщо a – радіус електродів, D – відстань між ними, то вираз для потенціалів електродів записується у вигляді:

$$\phi_+ = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{D} \right) + const,$$

$$\phi_- = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{a} \right) + const.$$

Тому різниця потенціалів електродів визначається за формулою:

$$\phi_+ - \phi_- = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{D} \right),$$

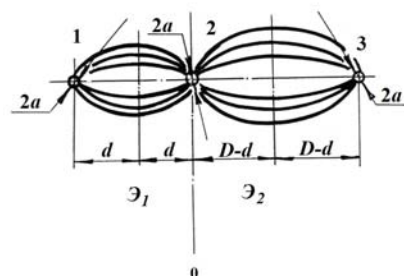
а опір

$$R = \frac{\phi_+ - \phi_-}{I} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{D} \right).$$

Якщо ж розглядати опір між електродами \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 , як показано на рис. 5, при цьому площина є ізолюю-

чою перетинкою з вбудованим електродом, то

$$R = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{2}{a} - \frac{D}{2d(D-d)} \right].$$



1, 2, 3 – сферичні електроди (розрахунок); \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 – вимірювальні електроди; 0 – ізолююча перетинка з електропровідним отвором.

Рисунок 5. Схема розташування електродів у середовищі, що проводить

Вирішення засноване на методі електричних зображень. Розраховані по цій формулі залежності представлені на рис. 6. Криві 1 – 4 описують зміну опору моделі при різних діаметрах провідної поверхні мембрани. Видно, що зі зменшенням контурної площі електроопір зростає аналогічно експериментальній залежності. Причому початкова ділянка кривих, що відповідає швидкому підйому опору, визначається формуванням опору стягування. Вихід на плато всіх кривих обумовлений неврахуванням границь середовища, що проводить. Характер кривих 5-9 визначається зміною положення мембрани відносно вимірювальних електродів. Причому один з електродів вважався нерухомим (відповідає початку координат), а другий рухався так, як і у експерименті. Спостерігається якісна узгодженість розрахованих і експериментальних залежностей. Це проявляється як у формуванні ділянки опору стягування, так і у зміні опору при зміщенні мембрани відносно електродів.

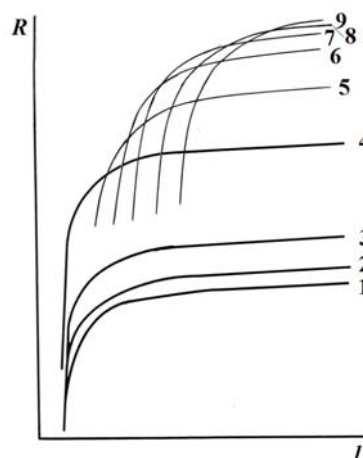


Рисунок 6. Теоретична залежність опору від відстані між електродами.

При різних діаметрах ядерної мембрани, $2a$: 1 – 68; 2 – 51; 3 – 34; 4 – 17 мм. При різних положеннях мембрани, d : 5 – 1,5; 6 – 2,5; 7 – 3,5; 8 – 4,5; 9 – $5,5 \times 10^{-2}$ м.

V. ВИСНОВКИ

Розроблено принципово нову експериментальну модель контактного електричного опору на основі ядерних мембран. Така модель дозволяє моделювання різних за розміром та розподілом площадок контакту. Виконані експериментальні та теоретичні дослідження підтверджують можливість використання моделювання контактного електроопору на основі графітових паперів та ядерних мембран.

Електроопір сполученої пари металевих тіл визначається сумою об'ємного електроопору і опору, обумовленого контактними поверхнями. Контактний електроопір, в основному, визначається величиною фактичної площі. Зміна топографії електричного поля за рахунок зміщення контактної площі відносно електродів впливає на значення контактного електроопору. Для повного формування опору стягування (максимального значення) відстань від електрода до контактної площі повинна бути більшою за довжину стягування ліній струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ніценко, В.В. Дослідження похибок трансформаторів струму у системах релейного захисту в усталених та перехідних режимах енергосистеми / В.В. Ніценко, Д.О. Кулагін, П.В. Махлін // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 59-71.
- [2] Barber, J.R. Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies / J.R. Barber // Proceedings of the Royal Society of London A. – 2003. – № 459. – P. 53-66.
- [3] Prediction of Electrical Contact Resistance of Tin-plated and Silver-plated Terminals / S. Sawada, K. Shimizu, S. Shimada and others // SEI Technical Review. – 2010. – № 71. – P. 37-43.
- [4] Janiszewski, J. Vacuum switches contact resistance / J. Janiszewski, A. Ksiazkiewicz // Computer Applications in Electrical Engineering. – 2014. – № 12. – P. 227-236.
- [5] Kogut, L. Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces / L. Kogut, K. Komvopoulos // Journal of Applied Physics. – 2003. – № 94. – P. 31-53.
- [6] Impact of the surface roughness description on the electrical contact resistance of ohmic switches under low actuation forces / F. Pennec, D. Peyru, D. Leray and others // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2012. – № 2(1). – P. 85-94.
- [7] Короткевич, С.В. Оценка толщины смазочного слоя в подшипниках качения электрорезистивным методом / С.В. Короткевич, О.В. Холодилов // «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов»: материалы 6-й межд. науч.-техн. конф., 19-20 сентября 2017. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 382-388.
- [8] Duraj, A. Analysis and Prediction of Electrical Contact Resistance for Anisotropic Conductive Adhesives / A. Duraj, P. Mach // Proceedings of 31st ISSE “Manufacturing processes, process simulation and optimization”. – Budapest, 2008. – P. 358-362.
- [9] Павленко, Т.П. Определения параметров состава композиции псевдожидкометаллических контактов по математической модели / Т.П. Павленко // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 1. – С. 14-18.
- [10] Read, M.B. Contact Resistance in Flat Thin Films / M.B. Read, J.H. Lang, A.H. Slocum // Proceedings of the 55th IEEE Holm conference on Electrical Contacts. – 2009. – P. 303-309.
- [11] Мурашов, М.В. Численное моделирование электрической проводимости контактов шероховатых тел. / М.В. Мурашов, С.Д. Панин, С.М. Климов // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 1. – С. 189-200.
- [12] Stress-dependent Electrical Contact Resistance at Fractal Rough Surfaces / C. Zhai, D. Hanaor, G. Proust, Y. Gan // Journal of Engineering Mechanics. – 2015. – № 5. – P. 13-19.
- [13] Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.
- [14] Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
- [15] Павлейно, О.М. Уточнение границ применимости хольмовского приближения для расчета сопротивления электрических контактов / О.М. Павлейно, В.А. Павлов, М.А. Павлейно // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 5. – С. 56-62.
- [16] Затовский, В.Г. Экспериментальное моделирование сопротивления стягивания / В.Г. Затовский, Н.В. Минаков // Электрические контакты и электроды. – 2010. – № 5. – С. 132-138.
- [17] Флеров, Н.Б. Практические применения пучков тяжелых ионов / Н.Б. Флеров, В.С. Барашенков // Успехи физических наук. – 1974. – № 2. – С. 351-373.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2018

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ

- ЛОСКУТОВ С.В. д-р ф.-м. наук, профессор, профессор кафедры физики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: svl@zntu.edu.ua;
- ЩЕТИНИНА М.О. ст. лаборант кафедры ТАД Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: Majtimo11@gmail.com;
- ЗЕЛЕНИНА Е.А. аспирант кафедры физики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: hellen_shi@mail.ru.

Цель работы. Определить вклад реального распределения пятен контакта в общую проводимость контакта проводников.

Методы исследования. Исследования электрического сопротивления стягивания осуществлялись на моделях. Экспериментальная часть данной работы выполнялась на бумаге с графитовым слоем с перемычками (первый тип) и на электропроводящих жидкостях с дискретными перегородками (второй тип).

Полученные результаты. Показано, что контактное электросопротивление в основном определяется величиной фактической площади контакта металлов. Получены экспериментальные зависимости электросопротивления модели второго типа от расстояния между электродами и распределение потенциала по поверхности образца для модели первого типа. Рассмотрена теоретическая модель, основанная на принципе суперпозиции электрических полей. Зависимости, полученные экспериментально и рассчитанные с помощью теоретической модели, хорошо согласуются.

Научная новизна. Впервые исследованы закономерности формирования электрического сопротивления стягивания на большом количестве перемычек. Разработана новая модель дискретного электрического контакта на основе жидкости в качестве проводящей среды с перемычкой из ядерной мембраны. Сделаны выводы о аддитивности контактного и объемного электросопротивления.

Практическая ценность. На основе результатов данных исследований была разработана новая экспериментальная методика кинетического макроидентирования, что в качестве параметра деформирования поверхностного слоя металлов использует площадь фактического контакта. Данная методика позволяет определять величину средних контактных напряжений, границу текучести, изменение напряжений по глубине деформирования в зависимости от режимов обработки поверхности.

Ключевые слова: сопротивление стягивания; фактическая площадь; электрический потенциал; ядерная мембрана

CONTACT RESISTANCE MODELING

- LOSKUTOV S. V. Sci.D, Professor, Professor of department of physics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: svl@zntu.edu.ua;
- SCHETININA M.O. laboratory assistant, department of aero-engine technologies, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: Majtimo11@gmail.com;
- ZELENINA O. A. post-graduate student, department of physics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: hellen_shi@mail.ru.

Purpose. To determine the contribution of the real contact spots distribution in the total conductivity of the conductors contact.

Methodology. The electrical contact resistance research was carried out on models. The experimental part of this work was done on paper with a graphite layer with membranes (the first type) and conductive liquids with discrete partitions (the second type).

Findings. It is shown that the contact electrical resistance is mainly determined by the real area of metal contact. The experimental dependence of the electrical resistance of the second type model on the distance between the electrodes and the potential distribution along the sample surface for the first type model were obtained. The theoretical model based on the principle of electric field superposition was considered. The dependences obtained experimentally and calculated by using the theoretical model are in good agreement.

Originality. The regularity of the electrical contact resistance formation on a large number of membranes was researched for the first time. A new model of discrete electrical contact based on the liquid as the conducting environment with nuclear membrane partitions was developed. The conclusions of the additivity of contact and bulk electrical resistance were done.

Practical value. Based on these researches, a new experimental method of kinetic macroindentation that as a parameter of the metal surface layer deformation uses the real contact area was developed. This method allows to determine the value of average contact stresses, yield point, change of the stress on the depth of deformation depending on the surface treatment.

Keywords: contact resistance; real area; electric potential; nuclear membrane

REFERENCES

- [1] Nitsenko, V., Kulagin, D., & Makhlin, P. (2016). Investigation of errors of current transformers in the protection systems in steady and transient conditions of energy system. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 59-71. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-7>. [in Ukrainian]
- [2] Barber, J.R. (2003). Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 459, 53-66.
- [3] Sawada, S., Shimizu, K., Shimada, S., Hattori, Y. (2010). Prediction of Electrical Contact Resistance of Tin-plated and Silver-plated Terminals. *SEI Technical Review*, 71, 37-43.
- [4] Janiszewski, J., Ksiazkiewicz, A. (2014). Vacuum switches contact resistance. *Computer Applications in Electrical Engineering*, 12, 227-236.
- [5] Kogut, L., Komvopoulos, K. (2003). Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces. *Journal of Applied Physics*, 94, 31-53.
- [6] Pennec, F., Peyru, D., Leray, D., Pons, P., Plana, R., Courtade, F. (2012). Impact of the surface roughness description on the electrical contact resistance of ohmic switches under low actuation forces. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2(1), 85-94.
- [7] Korotkevich, S.V., Holodilov, O.V. (2017). *Ocenka tolshhiny smazochного sloja v podshipnikah kachenija jelektrorozivnym metodom [The evaluation of the lubricating layer thickness in rolling bearings by an electric resistive method]*. Materialy 6-j mezhd. nauch.-tehn. konf. "Sovremennye metody i pribory kontrolja kachestva i diagnostiki sostojanija ob'ektov". Mogilev: Belorussko-Rossijskij universitet, 382-388. [in Russian]
- [8] Duraj, A., Mach, P. (2008). *Analysis and Prediction of Electrical Contact Resistance for Anisotropic Conductive Adhesives*. Proceedings of 31th ISSE "Manufacturing processes, process simulation and optimization". Budapest, 358-362.
- [9] Pavlenko, T.P. (2013). Opredelenija parametrov sostava kompozicii psevdohidkometallicheskih kontaktov po matematicheskoj modeli [The determination of the composition parameters of pseudo-liquid-metal contacts according to the mathematical model]. *Elektro-tehnika ta elektroenergetika*, 1, 14-18. [in Russian]
- [10] Read, M.B., Lang, J.H., Slocum, A.H. (2009). *Contact Resistance in Flat Thin Films*. Proceedings of the 55th IEEE Holm conference on Electrical Contacts, 303-309.
- [11] Murashov, M.V., Panin, S.D., Klimov, S.M. (2015). Chislennoe modelirovanie jelektricheskoy provodimosti kontaktov sherohovatyh tel [The numerical simulation of electrical conductivity of the rough body contacts]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.Je. Bauman*, 1, 189-200. [in Russian]
- [12] Zhai, C., Hanaor, D., Proust, G., Gan, Y. (2015). Stress-dependent Electrical Contact Resistance at Fractal Rough Surfaces. *Journal of Engineering Mechanics*, 5, 13-19.
- [13] Hol'm, R. (1961). Jelektricheskie kontakty. M. Inostrannaja literature, 464.
- [14] Demkin, N.B., Ryzhov, Je.V. (1981). Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin. M. Mashinostroenie, 244.
- [15] Pavlejno, O.M., Pavlov, V.A., Pavlejno, M.A. (2010). Utochnenie granic primenimosti hol'movskogo priblizhenija dlja rascheta soprotivlenija jelektricheskikh kontaktov [The refinement of the applicability limits of the Holm approximation for calculating of the electrical contact resistance]. *Jelektronnaja obrabotka materialov*, 5, 56-62. [in Russian]
- [16] Zatovskij, V.G., Minakov, N.V. (2010). Jeksperimental'noe modelirovanie soprotivlenija stjagivaniya [The experimental simulation of the contraction resistance]. *Jelektricheskie kontakty i jelektrrody*, 5, 132-138. [in Russian]
- [17] Flerov, N.B., Barashenkov, V.S. (1974). Prakticheskie primenenija puchkov tjazhelyh ionov [Practical applications of heavy ion beams]. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2, 351-373. [in Russian]